

CALIDAD DE FORMA DEL FUSTE DE *Pinus pinaster* Aiton EN CLIMA ATLÁNTICO. MODELO RADICAL PARA LA PREDICCIÓN EN PLANTACIONES JUVENILES

F.J. Lario¹, L. Ocaña², J.R. Rodríguez¹, J.A. Gómez¹

¹ TRAGSA. Departamento de Mejora Agroforestal.

Ctra. Maceda-Valdrey km 2 Maceda 32700. Ourense; e-mail: flario@tragsa.es

² TRAGSA. Departamento de Mejora Agroforestal. Dirección Técnica.

C/ Maldonado, 58 – 4ª planta. 28006 Madrid; e-mail: locana@tragsa.es

Resumen

Se presentan los trabajos de identificación y evaluación de relación entre parámetros radicales y de forma de fuste de árboles de *Pinus pinaster* Aiton juvenil llevados a cabo en una plantación piloto situada en la C. A. de Galicia. La plantación piloto tenía desde árboles muy inclinados y torcidos, hasta árboles totalmente verticales. Se realizaron mediciones de la inclinación de cada árbol a través de la desviación de la vertical (DV) y desviación de la rectitud (DR). Se demostró la significación ($p < 0,01$) de una fuerte relación entre DR y DV. Los árboles medidos se extrajeron completos (parte aérea y parte radical). Se analizaron todas las raíces del sistema radical desde una clasificación en función de la rigidez y la orientación con respecto a la inclinación, y se midieron sus dimensiones de longitud, diámetro basal y apical. Con estos datos se calcularon superficies de transmisión de fuerzas de sujeción (STFS) en función de un modelo físico de caída teórico propuesto. Se concluyó que para la plantación piloto estudiada las raíces responsables de la intensidad de la inclinación y rectitud eran las de raíces geotrópicas y rígidas (63,1 por cien; $p < 0,01$), y las raíces flexibles trabajando en tracción orientadas hacia la dirección de caída y perpendicular a ésta (36,9 por cien; $p < 0,01$). Finalmente, se realizó un análisis de regresión por eliminación progresiva entre el valor de la inclinación y rectitud y las superficies de transmisión de fuerzas con un r^2 máximo de 93,24 y 91,75 por ciento, respectivamente.

Palabras clave: biomecánica, inclinación, rectitud, raíz, morfología, cabeceo

Summary

Works on identification and evaluation of the relationship between root parameters and bole form in juvenile *Pinus pinaster* Aiton of a pilot plantation in Galicia (Spain) are presented. Trees from completely leaned and crooked trees, to completely vertical and straight trees were observed. Measurements of leaning and bole form through deviation of verticality (DV) and deviation of straightness (DR) were taken. A strong relationship ($p < 0,01$) between DR and DV was demonstrated. The very same measured trees were extracted in a whole (aerial and radical part). Then, every single root were classified on the bases of its rigidity and orientation with respect to leaning, and data of length, basal and apical diameter were taken. With these data, strains transmission surfaces of subjection were calculated (STFS) from a proposed theoretical physic model. It was concluded that for the pilot plantation studied roots responsible for the grade of leaning and straightness were those rigid roots growing geotropically (63,1 per cent; $p < 0,001$), and flexible roots growing towards leaning direction and orthogonal to leaning direction (36,9 per cent; $p < 0,01$). Finally, a progressive elimination regression procedure was done between DV and DR and all the strains transmission surfaces, obtaining a maximum r^2 of 93,24 y 91,75 per cent, respectively.

Keywords: biomechanics, leaning, straightness, root, and morphology, toppling

INTRODUCCIÓN

Existen evidencias de que la inclinación o inestabilidad de un árbol en estado de repoblado tras episodios de fuertes vientos está directamente relacionada con la posterior forma del fuste (CHAVASE, 1978; AUBERLINDER, 1982; BALNEAVES & DE LA MARE, 1989; LINDSTRÖM & RUNE, 1999; COXE *et al.*, 2005) en especies o condiciones estacionales que propician rápidos crecimientos del árbol. Sin embargo, esta relación se ha considerado de menor importancia frente a otras causas como pérdida de yema apical (SIERRA-DE-GRADO y GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, 1997) en casos en que, probablemente, las condiciones ecológicas de las localizaciones de los trabajos sugieren crecimientos relativos más bajos.

La inestabilidad en repoblaciones de especies de crecimiento rápido, se asocia por algunos autores con la

deformación radicular inducida en el cultivo de brinzales en vivero (CHAVASE, 1978; FRANCKET & NAJAR, 1978; GRENE, 1978; HAGNER, 1978; HAY & WOODS, 1978; HULTÉN & JANSSON, 1978; AUBERLINDER, 1982; HALTER *et al.*, 1993).

FRANCKET & NAJAR, 1978, DANJON *et al.*, 1999 y AUBERLINDER, 1982 estudiaron la inclinación del árbol junto con los caracteres de sinuosidad y curvatura e intentaron correlacionarlos con morfología radical. El presente documento sigue esta línea de trabajo, e intenta identificar morfología radicular diferencial de árboles plantados en campo con el estado de inclinación y rectitud en el momento de la extracción.

Los objetivos de este estudio son:

- 1.- Determinar la fiabilidad de 2 nuevos parámetros: desviación de la verticalidad y desviación de la rectitud, utilizados para describir el grado de inclinación y rectitud de los árboles
- 2.- Determinar la importancia mecánica de las partes de la raíz que se identifican a partir de su clasificación por rigidez y por orientación relativa con respecto al movimiento de vuelco del árbol, evaluadas a partir de las superficies de transmisión de esfuerzos que presentan.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material vegetal

La prospección se realizó sobre una repoblación realizada en el monte Fiero y Fontefoso, situado en el concello de Bande (Ourense). La plantación tiene una precipitación media anual de 1062 mm y una temperatura media de 13 °C. El clima corresponde a un clima sub-oceánico tendente a la mediterraneización. La preparación del terreno fue un subsolado en una sola dirección. Esta plantación, con condiciones ambientales homogéneas, mostraba individuos con distinto grado de inclinación, presentando desde árboles totalmente verticales, a árboles fuertemente inclinados. La plantación se había realizado con planta cultivada en envase de paredes continuas y contaba en el momento de la medición con 6 años. La selección de individuos se realizó *de visu* sobre dicha parcela con el criterio de obtener la máxima representación de los distintos grados de inclinación, desde los más verticales hasta los más inclinados. Se seleccionaron 9 árboles tendentes a la verticalidad y 9 árboles tendentes a la inclinación.

Método

Sobre dichos árboles se concretaron 3 fases en la realización del trabajo.

1.- Cuantificación de la inclinación del árbol y de la rectitud del fuste

Para estimar ambos parámetros se utilizó el concepto de “punto de cambio de dirección del tallo” que es el punto de curvatura en el tronco como consecuencia de distinta sensibilidad a diversos factores deformantes externos (SIERRA-DE-GRADO *et al.*, 1997) y de la diferente habilidad para recuperar la verticalidad.

Desviación de la vertical (DV): es la distancia más corta entre una recta ortogonal al suelo desde la base del tronco y el punto en el fuste donde se produce el primer cambio de dirección. Presumiblemente, este primer cambio de dirección indicaría el primer vuelco del árbol. Se decide utilizar el primer cambio de dirección del tallo, puesto que a partir del segundo cambio las mediciones se verían muy afectadas por las inclinaciones y recuperaciones siguientes, haciendo el parámetro poco comparable (Figura 1).

Desviación de la rectitud (DR): se supone un eje central a lo largo del fuste desde la raíz hasta el ápice, y con una cuerda de 1m se une el punto de inserción de la primera raíz hasta donde corte al eje del tronco. La desviación de la rectitud se cuantificó por la flecha que forma dicha cuerda con el punto del primer cambio de dirección (Figura 1).

2.- Valoración de la capacidad mecánica de la raíz a través de parámetros morfológicos de la misma.

Según se razona en un estudio previo (LARIO y OCAÑA, 2004) el punto de apoyo de la palanca en el momento de fallo mecánico, manifestado por la inclinación del árbol, en árboles jóvenes cultivados en vivero en envase de paredes continuas, sería la punta distal de la raíz principal rígida o la zona basal del antiguo cepellón del envase (cepa).

La capacidad de sujetar al árbol en su caída se consideró directamente relacionada con los esfuerzos de presión y de tracción de las raíces que salían de dicha cepa, y de los esfuerzos de presión de la propia "cepa" o, en su caso, de la raíz principal rígida.

Basándonos en los resultados de STOKES & MATTHECK, 1996, se cuantificó la resistencia a tracción de una raíz por su sección. De la misma manera, puede entenderse que la sección en el punto de inserción a una raíz rígida de orden superior, podrá ser un indicador fiable de la capacidad de transmitir las

fuerzas de tracción al conjunto del árbol.

Los esfuerzos de presión (raíz/suelo) a que están sometidas las raíces rígidas, estarán en función de la superficie de raíz en contacto con el suelo y se cuantificaron por la proyección en un plano del cono truncado que forma la raíz, considerando la longitud desde su punto de inserción hasta el punto en el que pierde su rigidez.

Se diferenciaron en el sistema radical 5 sectores respecto del eje central del árbol, y considerando la dirección y sentido de caída para la numeración de los mismos. Se diferenciaron 4 sectores de 90 grados con el vértice situado en el eje central del árbol en posición horizontal y un quinto sector donde se encontraban las raíces orientadas geotrópicamente, formado por un cono imaginario de 90 grados de amplitud con vértice a la altura del cuello de la planta. El sector denominado 1 se localizó centrado en la dirección de inclinación del árbol. Los demás sectores se numeraron correlativamente siguiendo el sentido de las agujas del reloj. Los parámetros calculados y los correspondientes parámetros medidos para cada sector fueron:

1. superficie de presión de la cepa (SPCEPA): profundidad de cepa y diámetro de cepa
2. superficie de presión de las raíces rígidas de cada sector (SPRR1, SPRR2, SPRR3, SPRR4, SPRR5): definida por la suma del producto del diámetro de inserción en las raíces rígidas de orden superior de las raíces rígidas del sector correspondiente, y la longitud de dichas raíz hasta la zona de transición a flexible
3. superficies de tracción de raíces rígidas de cada sector (STRR1, STRR2, STRR3, STRR4) serán las superficies de inserción a la cepa y a las raíces rígidas: diámetro de las raíces del sector correspondiente, a la altura de su inserción en una raíz rígida de orden superior
4. superficies de tracción de las raíces flexibles de cada sector (STRF1, STRF2, STRF3, STRF4) serán las superficies de inserción a la cepa y a las raíces rígidas de orden superior, de raíces flexibles

3.- Análisis

Análisis de los parámetros descriptivos de inclinación y rectitud del árbol

Para la comprobación de la fiabilidad de los parámetros desviación de la verticalidad y desviación de la rectitud, se utiliza un análisis ANOVA según el modelo:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde y_{ij} es el valor de desviación de la verticalidad para el individuo j del grupo i , μ es la media poblacional, τ_i es la desviación respecto de la media del grupo i según el estado de inclinación (inclinados o verticales), ε_{ij} es la desviación respecto a los sumandos anteriores del individuo j en el grupo i .

El mismo modelo se utiliza para el parámetro desviación de la rectitud.

El número de repeticiones por grupo fue $n = 9$

Los niveles de agrupación fueron 2: inclinados y no inclinados

Las variables analizadas fueron la desviación de la verticalidad y la desviación de la rectitud

Análisis de la distribución espacial de las superficies de transmisión de fuerzas

Para el análisis de la importancia mecánica de cada una de las partes de la raíz se optó por utilizar 2 tipos de análisis. El primer análisis fue un ANOVA de un sólo factor, estado de la inclinación, con 2 niveles (vertical, inclinado). El análisis se llevó a cabo para cada uno de los parámetros que representan las superficies de transmisión de fuerzas, definidos en el apartado anterior.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

donde y_{ij} es el valor del parámetro de trabajo (superficie de transmisión de fuerzas correspondiente) para el individuo j del grupo i , μ es la media poblacional, τ_i es la desviación respecto de la media del grupo i , ε_{ij} es la desviación respecto los sumandos anteriores del individuo j en el grupo i .

El número de repeticiones fue $n = 9$.

Los niveles de agrupación para el parámetro estado de inclinación fueron 2: inclinado y no inclinado.

Los parámetros cuantitativos de respuesta fueron los definidos en el apartado anterior relativo a las superficies de transmisión de fuerzas.

En todos los análisis se hizo control de los valores raros, se comprobaron las hipótesis de normalidad, homocedasticidad o igualdad de varianzas y aleatorización del ANOVA, y se transformaron los datos para normalizar la distribución de los datos y los residuos cuando no lo eran.

Para la evaluación del efecto transmisor por separado, de las zonas predefinidas, se realizó una selección del modelo de regresión lineal por eliminación progresiva tanto para el parámetro desviación de la rectitud, como para el parámetro inclinación, y se calculó el coeficiente r^2 máximos.

RESULTADOS

Inclinación y rectitud del árbol

Los valores de las variables utilizadas como indicadores de inclinación y rectitud tuvieron una relación directa con la clasificación hecha *a priori* en inclinados y verticales. Entre ambas poblaciones hubo diferencias significativas al 99 por ciento de la mínima diferencia significativa (MDS) ($p < 0,01$), para los dos parámetros: desviación de la vertical y desviación de la rectitud. El valor medio de la desviación de la vertical para los árboles inclinados fue de 24,6 cm, y para los árboles verticales de 2,0 cm. El valor medio de la desviación de la rectitud para árboles inclinados fue de 6,4 cm, mientras que para los árboles verticales fue de 1,3 cm.

Ambas variables presentaron una relación lineal significativa ($p < 0,01$), con un coeficiente de correlación de 0,91. La ecuación de la regresión que define la relación entre ambas variables fue:

$$DR = 1,41749 + 0,179479 DV$$

Distribución espacial de las superficies de transmisión de fuerzas

A la vista de los resultados de la Tabla 1, la inclinación de los árboles observados está directa y significativamente relacionada con la presencia de raíces verticales o geotrópicas rígidas exteriores al cepellón de vivero (SPRR5) y, en menor medida, por la cantidad de raíces flexibles de dirección paralela a la superficie del suelo, en el sentido del movimiento del vuelco y perpendicular a este (STRF1, STRF4, pero no STRF2 Y STRF3). Además, se observa que son significativas aquellas diferencias que muestran valores positivos altos de diferencia de medias de la superficie de transmisión. La importancia de las raíces rígidas orientadas geotrópicamente se evidencia por los valores 5,41 veces más altos que el de las raíces flexibles funcionales. Finalmente, los valores altos de diferencia de medias de las superficies rígidas de presión SPRR2, SPRR3 y SPRR4, sugieren que están cerca de la significación. Además, el signo negativo en dichos valores apunta a que los árboles inclinados tienen mayores superficies de presión orientadas paralelamente al suelo que los árboles verticales. Existe, por tanto, una reorientación de la dirección de las raíces rígidas geotrópicas, producida en algún momento del cultivo en vivero o campo, a orientaciones orto-geotrópicas. Estas reorientaciones estarían siendo las responsables de las posiciones inclinadas de los árboles encontradas en el campo.

Por último, en el análisis de regresión por eliminación progresiva para modelos lineales se consiguieron r^2 máximos de 93,24 y 91,75 por ciento, para la desviación de la vertical y de la rectitud respectivamente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La inclinación y la rectitud

La verticalidad y la rectitud de árboles en campo pueden estar fuertemente relacionadas entre sí (Auberlinder, 1982; Balneaves y de la Mare, 1989; Lindström y Rune, 1999) como también se confirma en este trabajo. El crecimiento geotrópico negativo de la parte aérea de las plantas reorienta verticalmente el brote inclinado no lignificado del año, provocando de esta forma un ángulo de redirección. La curvatura se produce debido a un crecimiento diferencial en los 2 lados de un órgano y por ello, sólo reaccionan las partes del árbol capaces de crecer (Denffer *et al.*, 1988).

En un trabajo en que se evaluaban la curvatura de la metida, la sinuosidad del tronco y la diferencia a la vertical del tronco (BALNEAVES & DE LA MARE, 1989), no hubo una relación directa entre curvatura de la metida y sinuosidad aparecida, probablemente debido a que la intensidad de la sinuosidad de un árbol es el resultado del efecto acumulado de episodios de inclinación, y la capacidad de recuperar la estabilidad del árbol.

Por otra parte, mediciones subjetivas de la rectitud pueden no ser buenas descriptoras de la capacidad de sostenerse del árbol puesto que la medida de la rectitud puede integrar distintos episodios de inestabilidad a lo largo de los años, o incluso, puede ser debida a otras causas como la pérdida de yemas apicales por heladas (SIERRA-DE-GRADO y GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, 1997). Una mejor aproximación la daría el ángulo formado por la inclinación del tronco en el primer metro de altura. Sin embargo, DANJON *et al.*, 1999, no encontró significación en la correlación entre ambos parámetros.

Partes de la raíz relacionadas con la inclinación y la rectitud del árbol

Las superficies de transmisión de fuerzas de tracción correspondientes a las orientaciones 1 (la de la inclinación del árbol) y 4 (transversal a la 1 por el lado izquierdo) de las raíces estuvieron significativamente asociadas al estado de verticalidad del árbol. AUBERLINDER, 1982, también encuentra que hay mayor superficie transversal relativa de raíces generadas en el cepellón en la orientación de la inclinación de los árboles inestables. Esto confirmaría la existencia de algún mecanismo por el que el árbol favorecería mayores superficies de transmisión de tracción de la orientación 1 en árboles inclinados. Los resultados en la orientación 4 también podrían confirmar las observaciones de AUBERLINDER, 1982 ya que él considera área de inclinación del árbol al área definida por 135 grados centrados en la proyección del tronco inclinado sobre el suelo, y este trabajo sólo considera un área de inclinación del árbol de 90 grados centrada en la dirección de la proyección del árbol inclinado sobre el suelo. Por tanto, las raíces de tracción afectadas por la inclinación podrían estar presentes en un área de mayor ángulo que el estudiado en este trabajo.

Por otro lado, en la plantación de estudio, la no-aparición de superficies de tracción en las orientaciones 2 y 3 puede deberse a una interrupción del crecimiento de éstas últimas por desecación. La parcela de muestreo estaba en pendiente estando los sectores 1 y 4 hacia aguas-arriba, y por tanto con mayor cantidad de suelo en torno a las raíces, y los sectores 2 y 3 estaban hacia aguas-abajo, con menor cantidad de suelo en torno a las raíces y en el lado del árbol más expuesto al sol. Sin embargo STOKES *et al.*, 1995, encontró que para raíces de 2 cm de diámetro las fuerzas transmitidas por las raíces someras orientadas en la dirección del viento resultarían en respuestas adaptativas, aumentando el número y tamaño de las raíces de sotavento y sobre todo en barlovento. Sin embargo, el mismo trabajo consideró que la acción del viento tendría un efecto menor que aquellos producidos por una nutrición desigual en el mismo cepellón o de suministro de agua. Lo que apoyaría la teoría de la falta de recursos en las orientaciones 2 y 3.

El sistema radicular leñoso forma la base rígida de soporte del árbol (COUTTS *et al.*, 1999). En términos de superficie de transmisión de fuerzas la superficie más importante que se presentó en los árboles verticales fue la correspondiente a orientaciones geotrópicas de las raíces rígidas, es decir, las correspondientes a la orientación 5. La relación entre la superficie de presión de la orientación 5 y la sumatoria de las de tracción del 1 y el 4 fue de 5,41 veces. De esta relación se podría pensar que al menos el 80 por ciento de la responsabilidad de la sujeción de los árboles verticales fue de las raíces rígidas orto-geotrópica. Esto concordaría con que las raíces en compresión del árbol fallan antes que las raíces en tensión en *Pinus pinaster* (STOKES, 1999) y por tanto serían las primeras responsables de la inestabilidad.

La metodología utilizada para cuantificar la importancia de las distintas partes de la raíz, se basó en el estudio de sectores de FRANCLET & NAJAR, 1978, pero se midieron todas las raíces. La novedad del método utilizado fue que se identificaron las raíces rígidas de las flexibles apoyado por la idea de que las raíces rígidas son las que transmitirían los esfuerzos al árbol, tanto los del suelo directamente, como los de las raíces flexibles y rígidas trabajando en tracción. La correlación encontrada es comparable con aquella concluida por LINDGREN & ÖRLANDER, 1978 entre los esfuerzos medidos a través de un dinamómetro y el área total de la sección transversal, $r^2=0,9$. La utilización del área total de sección transversal demuestra por tanto una buena fiabilidad para predecir la estabilidad del árbol, pero no aporta información de qué partes de la raíz tienen más o menos responsabilidad. Utilizando las superficies de transmisión de fuerzas se puede concluir que para asegurar la estabilidad de planta de *Pinus pinaster* cultivada en condiciones de alta productividad en vivero y en campo es fundamental el desarrollo de las raíces rígidas en profundidad. De hecho, se podría decir que el problema encontrado en los árboles inclinados fue la ausencia de dicho tipo de raíz.

Finalmente, para explicar el fenómeno del cabeceo y posterior curvatura de la base del tronco se podría plantear la siguiente hipótesis: que los factores ambientales y/o culturales que modifican el desarrollo de las raíces que serían mecánicamente funcionales en los primeros años en campo, son los que provocarían impedimentos físicos intensos y continuos con efecto localizado en esas raíces, que no impedirían que otras raíces mantuvieran función asimiladora de nutrientes y agua, y que, por tanto, conservarían a la planta fisiológicamente activa en su conjunto. Que estos impedimentos físicos, por repicado, provocarían la generación de mayor número de raíces, pero, retrasadas en la iniciación de sus tejidos, y por tanto de meristemos apicales más delgados. Esto provocaría una dispersión de recursos entre mayor número de meristemos de crecimiento, y que éstos fueran más delgados, con la depreciación en rigidez y resistencia asociada al diámetro. Las propiedades mecánicas de las raíces pueden extrapolarse de las propiedades de

la materia. La rigidez de una viga de sección circular está relacionada con la cuarta potencia de su diámetro, por tanto si la viga se divide en 2 vigas del mismo tamaño y suma de secciones igual a la viga origen, entonces, la rigidez total de las 2 nuevas vigas también se divide por 2 (COUTTS, 1983). Por tanto, la ramificación de raíces rígidas en otras más pequeñas aumentaría las posibilidades de aparición de inestabilidad para la misma cantidad de biomasa.

Agradecimientos

Los trabajos de la presente comunicación se encuadran dentro del proyecto “Estudio da calidade da masa e risco da inestabilidade das plantacions forestais galegas de *Pinus pinaster*. Definición de criterios de calidade estrutural e fisiolóxica das plantas de viveiro. PGIDIT03RFO02E”, del Programa de Biodiversidade e Recursos Forestais, Consellería de Innovación, Industria e Comercio de la Xunta de Galicia, realizada en colaboración con la Escuela Politécnica Superior de Lugo, USC. Mención especial hay que hacer al Servicio de Montes e Industrias Forestales, Consellería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia, y en especial recuerdo a Angel Romero, forestal de vocación. Así mismo, agradecemos la colaboración prestada por VIFOGA y CIFA Lourizán en el impulso de definición de los trabajos iniciales. Especial mención hay que hacer a la gente que desde la rigurosidad de las mediciones de planta han cimentado la definición de las presentes conclusiones.

BIBLIOGRAFÍA

- AUBERLINDER, V., 1982. "De l'instabilité du pin maritime." *Afocel Annales*: 139-176.
- BALNEAVES, J.M., DE LA MARE, P.J., 1989. "Root patterns of *Pinus radiata* on five ripping treatments in a Canterbury forest." *New Zealand Journal of Forestry Science* 19((1)): 29-40.
- CHAVASE, C.G.R., 1978. The root form and stability of planted trees, with special reference to nursery and establishment practice. Root form of planted trees, Victoria, British Columbia.
- COUTTS, M.P., 1983. "Root architecture and tree stability." *Plant and Soil* 71: 171-188.
- COUTTS, M.P., NIELSEN, C.C.N., NICOLL, B.C., 1999. "The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers." *Plant and Soil* 217: 1-15.
- COXE, I., MENZIES, M., AIMERS-HALLIDAY, J., HOLDEN, G., 2005. Results of toppling trials in Northland. *Tree Grower*. February.
- DANJON, F., BERT, D., GODIN, C., TRICHET, P., 1999. "Structural root architecture of 5-year-old *Pinus pinaster* measured by 3D digitising and analysed with AMAPmod." *Plant and Soil* 217 (1/2): 49-63.
- DENFFER, D., ZIEGLER, H., EHRENDORFER, F., BRESINSKY, E., 1988. *Strasburger, Tratado de Botánica*. Barcelona, Ediciones Omega, S.A.
- FRANCLET, A., NAJAR, M., 1978. "Conséquences différées des déformations racinaires chez le pin maritime." *Afocel Annales*: 177-203.
- LARIO, F.J., OCAÑA, L., 2004. "Base mecánica de la inestabilidad de *Pinus pinaster* Aiton en plantaciones juveniles de climas atlánticos." *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 17: 175-180.
- LINDGREN, O., ÖRLANDER, G., 1978. A study on root development and stability of 6 to 7-year-old container plants. Root form of planted trees, Victoria, British Columbia.
- LINDSTRÖM, A., RUNE, G., 1999. "Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness." *Plant and Soil* 217(1/2): 29-37.
- SIERRA-DE-GRADO, R., GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, S.C., 1997. Straightness and loss of the apex in *Pinus pinaster* Ait. progeny test. *Plant Biomechanics*.
- STOKES, A., 1999. "Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement." *Plant and Soil* 217(1/2): 17-27.
- STOKES, A., FITTER, A.H., COUTTS, M.P., 1995. "Responses of young trees to wind and shading: effects on root architecture." *Journal of Experimental Botany* 46(290): 1139- 1146.
- STOKES, A., MATTHECK, C., 1996. "Variation of wood strength in tree roots." *Journal of Experimental Botany* 47(298): 693- 699.

Tabla 1.- Superficies de transmisión de fuerzas de las distintas partes de raíz, en función del sentido y dirección de crecimiento de las mismas, y de la clasificación *a priori* del estado de inclinación del árbol. Significación de la diferencia para cada grupo entre árboles verticales y árboles inclinados (ns=no significativo).

PARTES DE LA RAÍZ	valor p	SENTIDO DE LA DIFERENCIA	SUPERFICIE DE TRANSMISIÓN DE FUERZAS VALORES MEDIOS (no transformados)		VALOR DE LA DIFERENCIA DE MEDIAS (no transformadas)
			VERTICALES	INCLINADOS	
SPCEPA	ns	-	9.478,1	9.488,40	-10,3
SPRR5	< 0,01	S vert > S incl	6.805,4	0	6.805,4
SPRR1	ns	-	995,4	1.126,60	-131,1
SPRR2	ns	-	720,0	1.773,30	-1.053,3
SPRR3	ns	-	1.106,4	2.210,90	-1.104,4
SPRR4	ns	-	915,6	2.692,90	-1.777,3
STRR1	ns	-	191,6	336,8	-145,2
STRR2	ns	-	842,3	180,3	662,0
STRR3	ns	-	178,8	287,8	-109,0
STRR4	ns	-	177,4	282,3	-104,9
STRF1	< 0,01	S vert > S incl	1.859,8	603,2	1.256,6
STRF2	ns	-	2.211,7	1.608,50	603,2
STRF3	ns	-	1.809,6	1.357,20	452,4
STRF4	< 0,01	S vert > S incl	2.111,2	854,5	1.256,6

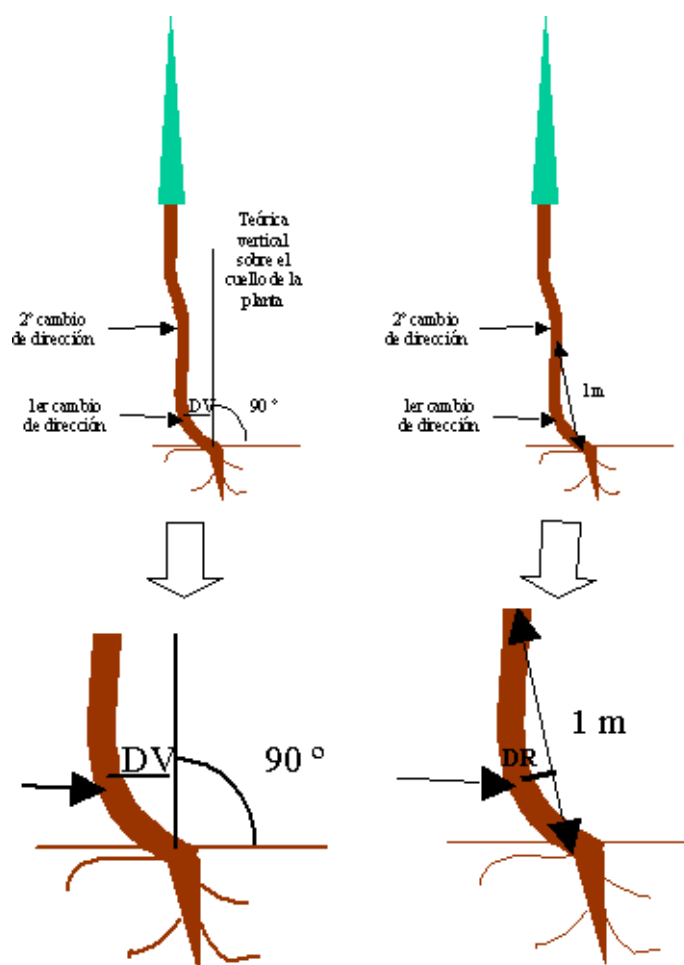


Figura 1.- Dimensión medida de la desviación de la vertical (DV) (izquierda); y de la desviación de la

rectitud (DR) (derecha).



Figura 2.- Estado de inclinación de la plantación prospectada. Ejemplo árbol recto (izquierda) y árbol inclinado (derecha) con sus respectivas raíces